

УДК 621.923.5

Ч.Ф. Якубов, канд. техн. наук, Э.Н. Сарычев, Симферополь  
М. Бютнер, Dipl.-Ing., Магдебург, Германия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ С ИЗНОСОСТОЙКИМ ПОКРЫТИЕМ AlCrN**

*У статті наведено порівняльні експериментальні стойкісні дослідження черв'ячних фрез з зносостійким покриттям AlCrN. Розглядається можливість самовиникнення досить міцних підповерхневих тонких шарів матриці інструменту на період існування покриття на інструменті.*

*В статье приведены сравнительные экспериментальные стойкостные исследования червячных фрез с износостойким покрытием AlCrN. Рассматривается возможность самообразования достаточно прочных подповерхностных тонких слоев матрицы инструмента на период существования покрытия на инструменте.*

*The paper presents comparative experimental study stoykostnye hobs with wear-resistant coating AlCrN. The possibility of a self-sufficient strength subsurface thin layers of the matrix tool for the duration of the coating on the tool.*

Производство зубчатых колес – одна из бурно развивающихся отраслей промышленности. В мировой практике наибольшее распространение получили цилиндрические зубчатые колеса, выпуск которых исчисляется сотнями миллионов штук в год. Основным методом нарезания цилиндрических зубчатых колес в условиях индивидуального, серийного и массового производства является зубофрезерование червячно-модульными фрезами методом обката на зубофрезерных станках. Однако, ему присущ ряд недостатков, к которым можно отнести высокую стоимость инструмента и низкую его низкую стойкость, несмотря на невысокие скорости резания.

Наибольшее влияние на работоспособность червячных фрез оказывают свойства инструментального материала.

Так, анализ рынка промышленно развитых стран на сегодняшний день показывает следующее:

1. Доля червячных фрез с покрытием превышает 95%, т.е. те же самые 5% остаются на долю инструмента без износостойкого покрытия.
2. Доля инструментов из быстрорежущей стали составляет 81%, а оставшиеся 19% приходятся на долю твердосплавных фрез.
3. Доля «обычной» быстрорежущей стали сегодня в производстве червячных фрез не превышает 20%, остальные 80% фрез изготавливаются из порошковой быстрорежущей стали.

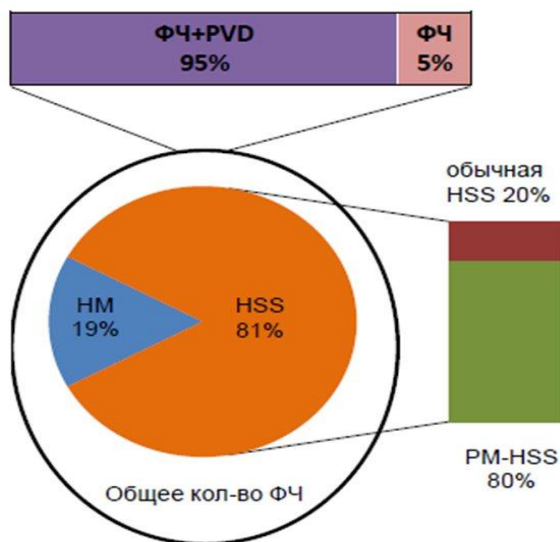


Рисунок 1 – Доля использования инструментального материала в производстве червячных фрез [1]

Таким образом, повышение работоспособности быстрорежущих червячно-модульных фрез является важной научно-практической задачей современной металлообработки.

В широком спектре традиционных и инновационных методов поверхностного упрочнения одним из наиболее эффективных и общепринятых являются нанесение на режущий инструмент твердых износостойких покрытий. Покрытия, как правило, имеют более низкий коэффициент трения по сравнению с инструментальным материалом. В результате снижается трение между стружкой и передней поверхностью режущего клина, что существенно снижает износ.

На сегодняшний день существует много видов износостойких покрытий на режущий инструмент. Они различаются по структуре, по химическому составу и толщине.

Так, одним из последних износостойких покрытий является покрытие AlCrN. Данное покрытие относится к многослойным и имеет тройную структуру (рис. 2):

- базовый слой покрытия AlCrN, обладает наилучшим сцеплением с инструментом и адгезией.
- центральный слой – нанослой из Al/CrN, обладает очень высокой вязкостью и способностью поглощения трещин.

- верхний слой представляет собой монокристалл (AlCrN), обладающий очень высокой твердостью и износостойкостью [2].

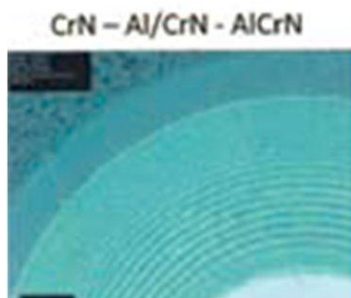


Рисунок 2 – Схема многослойного покрытия AlCrN [2]

Основные физико-механические свойства покрытия AlCrN представлены в табл. Важным свойством многослойных покрытий является способность останавливать возникающие трещины, которые распространяются не вглубь покрытия, а вдоль границ отдельных слоев [3].

Таблица – Физико-механические свойства покрытия AlCrN Balinit Alcrona pro. [3]

Микротвердость (HV 0,05)	3200
Мак температура применения	1100 °C
Коэффициент трения	0,35
Остаточные напряжения сжатия (GPa)	-3
Цвет	светло-серый
Толщина, мкм	2,5...3,0

Покрытие AlCrN может быть нанесено на червячные фрезы, как из порошковой быстрорежущей стали, так и из твердого сплава. Преимущество порошковой быстрорежущей стали, в отличие от «обычной» обусловлено мелкозернистой структурой и отсутствием ликваций: карбиды имеют малые размеры и очень хорошо распределены по всей массе материала.

Для определения влияния свойств износостойкого покрытия AlCrN на червячных фрезах были проведены сравнительные стойкостные исследования при зубофрезеровании.

Исследования проводились на базе Магдебургского технического университета им. Отто-фон-Гёрике «Институт технологий и обеспечения качества» (Германия). Использовался зубофрезерный станок модели LIEBHERR LC 180 с ЧПУ (рис. 3), применялось попутное фрезерование.

В связи с тем, что исследование вопросов повышения стойкости червячных фрез связаны со значительными затратами на изготовление опытного инструмента и с продолжительным периодом времени при достижении допустимого (критерия) износа, экспериментальная оценка осуществлялась при использовании одного режущего зуба. Так, цельную червячную фрезу разрезали на отдельные зубья с помощью электроэрозионной обработки, а режущий зуб устанавливали в специальную кассету, закрепленную на шпинделе станка (рис. 4). Дальнейшая эксплуатация инструмента осуществлялась по стандартной схеме зубофрезерования (рис. 5).



Рисунок 3 – Станок зубофрезерный модели LIEBHERR LC 180



Рисунок 4 – Конструкция однозубой червячной фрезы

В экспериментах применялись следующие комплекты зубьев из порошковой быстрорежущей стали марки S390: шесть зубьев без покрытия [PM-HSS(S390)], три из них с магнитно-абразивной обработкой (MAO) [PM-HSS(S390)+MAO]; шесть зубьев с покрытием AlCrN [PM-HSS(S390)+AlCrN], три из них с магнитно-абразивной обработкой [PM-HSS(S390)+AlCrN+MAO].

Зубья с MAO применялись для исследования влияния на стойкость, так как MAO можно отнести к одному из методов микроупрочнения режущих кромок.

Обрабатываемым материалом подвергалась зарубежная сталь марки 20MnCr5 (ZF7b), ее аналог отечественная легированная конструкционная сталь 18ХГ ГОСТ 4543-71.

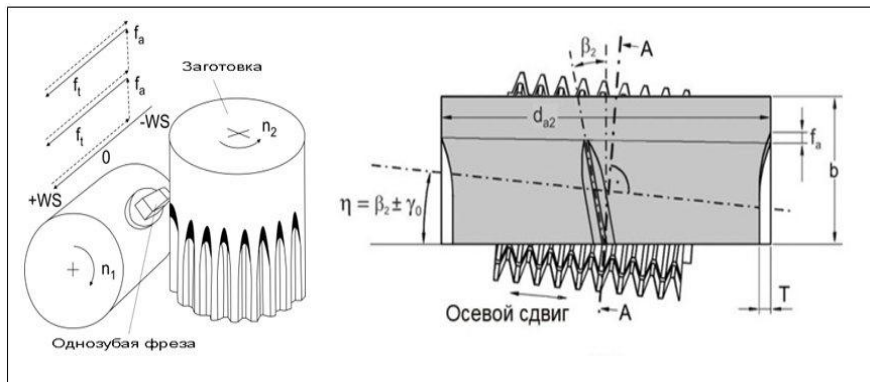


Рисунок 5 – Схема перемещений и геометрические параметры червячной фрезы

Геометрические параметры зубьев червячной фрезы для всех исследований были одинаковыми: модуль всех исследуемых зубьев 2,7 мм, диаметр фрезы 100 мм. Параметры заготовки следующие: число зубьев  $z_2=41$ , угол зацепления  $\alpha_n = 22,5^\circ$ , угол наклона  $\beta_2 = 24,52^\circ$ , диаметр вершин зубьев  $d_{a2} = 130$  мм, ширина колеса  $b_2=29$  мм (рис. 5). Нарезание осуществлялось всухую. За критерий изнашивания зубьев фрезы принят критический износ для всех поверхностей равный 0,13 мм.

Измерение износа по задней (Korf) и двух боковым поверхностям – входной (EF) и выходной (AF) режущим кромкам осуществлялось на специальном микроскопе MITUTOYO с точностью цифрового люнета до 3-го знака после запятой и при 64-кратном увеличении. Методика измерения представлена на рис. 6.

Измерение износа по передней поверхности после достижения критического износа осуществлялось на специальном устройстве MikroCAD GFM для 3D-измерений. Принцип работы устройства основан на методе изменения цветового спектра в зависимости от глубины измеряемого объекта (рис. 7).

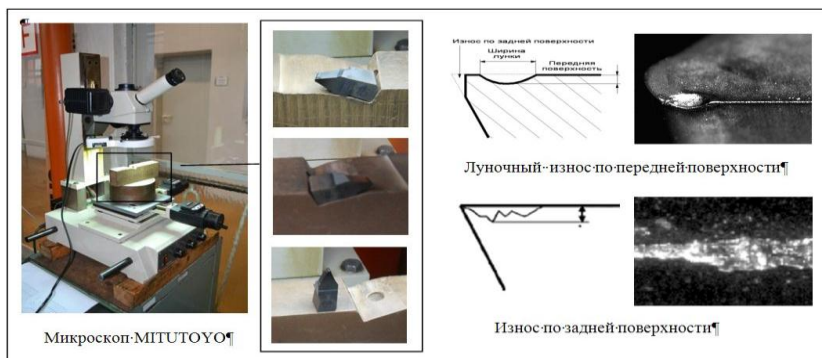


Рисунок 6 – Методика измерения износа зуба

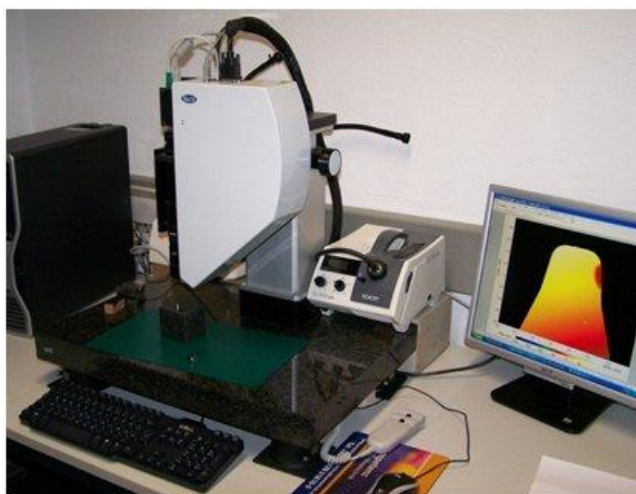
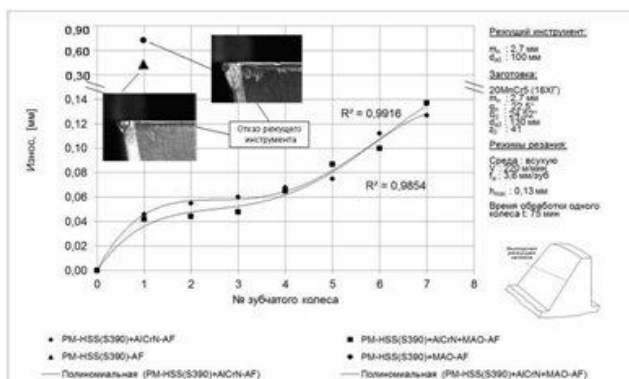


Рисунок 7 – Устройство MikroCAD GFM 3D

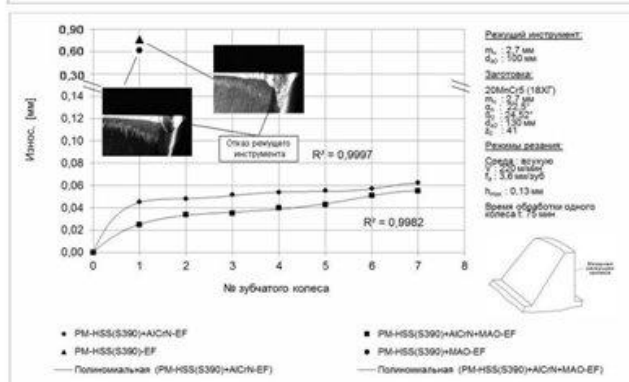
Результаты стойкостных исследований средних значений износа по каждому из четырех видов инструментального материала приведены на рис. 8. Снимки поверхностей зубьев после достижения критического износа представлены на рис. 9.

На всех графиках на рис. 8 (а, б, в) видим, что износ зубьев без покрытия [PM-HSS(S390)] и с обработкой MAO [PM-HSS(S390)+MAO] после нарезки одного колеса превысил максимально допустимый в 5-6 раз на всех поверхностях, т.е. произошел отказ режущего инструмента.

а)



б)



в)

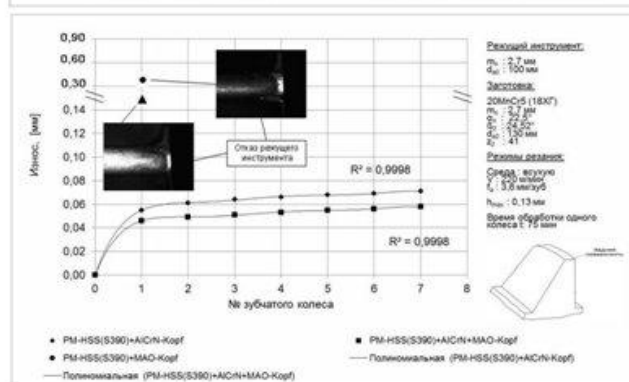


Рисунок 8 – Графики износа зубьев PM-HSS(S390), PM-HSS(S390)+MAO, PM-HSS(S390)+AlCrN и PM-HSS(S390)+AlCrN+MAO:

а) по выходной режущей кромке (AF);

б) по входной режущей кромке (EF);

в) по задней поверхности (Korф)

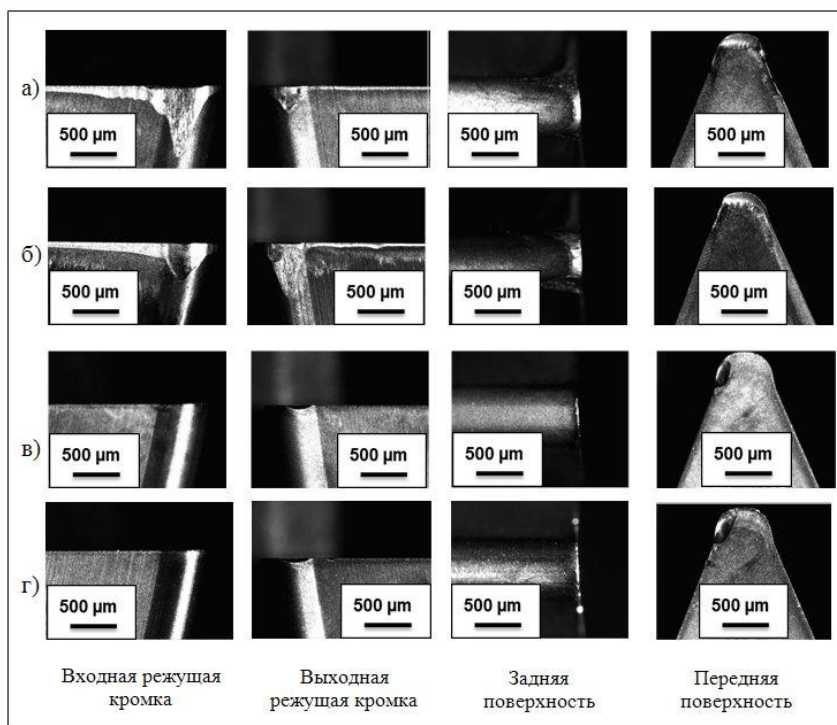


Рисунок 9 – Снимки износа зубьев по задним поверхностям:  
а) PM-HSS(S390), б) PM-HSS(S390)+MAO, в) PM-HSS(S390)+AlCrN,  
г) PM-HSS(S390)+AlCrN+MAO

Зубья с покрытием PM-HSS(S390)+AlCrN и PM-HSS(S390) + AlCrN+MAO достигли критического износа после обработки седьмого колеса на выходной режущей кромке. Кривые износа зубьев по входной режущей кромке ниже кривых износа по выходной режущей кромке и, соответственно, кривые износа по задней поверхности ниже кривых по входной режущей кромке.

Повышенный износ на выходной режущей кромке можно связать:

- с малыми толщинами слоя металла, удаляемого вершинным участком выходного режущего лезвия. При таком условии режущая кромка не режет, а вминает металл в поверхность резания, что вызывает значительное давление со стороны последней на заднюю поверхность, повышая ее износ.
- с деформацией стружки, отделяемыми входным и вершинным режущими лезвиями, и дальнейшее ее пакетирование в зоне наибольшего износа, приводящим к микровыкрашиванию режущего лезвия. В результате



этого, элементы стружки обволакивают режущее лезвие и начинают сходиться по задней поверхности, усиливая износ [4].

Также на графиках можем видеть, что зубья с MAO на протяжении обработки колес дают меньшее значение износа по сравнению с зубьями без MAO.

Полученные снимки износа передней поверхности на устройстве MikroCAD (рис. 10) позволяют отметить, что износ зубьев с покрытием имеет характер луночного, сконцентрированного в одной зоне поверхности. Другую картину износа можем видеть на зубьях без покрытия. Здесь зона износа расположилась от вершины зуба, и продвигается вдоль входной режущей кромки к основанию зуба. Характер такого износа объясняется большими контактными нагрузками в зависимости от обрабатываемого материала.

Общеизвестно, что покрытия, как хрупкие материалы, подвержены значительному повреждению во время приработки. Зачастую большая часть покрытия разрушается во время этой фазы износа, т.е. еще до начала нормальной стадии износа [5]. Для изучения этого явления после обработки каждого нарезаемого колеса фиксировался внешний вид передней поверхности зуба с покрытием PM-HSS(S390)+AlCrN, по которому устанавливался характер изменения площади контакта инструмента с обрабатываемой деталью (рис. 11).

Результаты снимков зуба из порошковой быстрорежущей стали с покрытием показали, что после разрушения покрытия, образовавшаяся лунка на передней поверхности зуба сохраняет стабильную форму за период обработки со второго по четвертое колесо, т.е. износ на этом участке некоторое время не прогрессирует.

Вероятно, это связано с эффектом деформационного упрочнения участка передней поверхности зуба червячной фрезы, находящегося в контакте с обрабатываемым материалом. Данное обстоятельство происходит в результате действия переменных циклических нагрузжений, вызывающих изменения субструктуры (формы зерен) инструментального материала на указанных участках за период существования покрытия, которое препятствует адгезионному и абразивному износу в период обработки. [6].

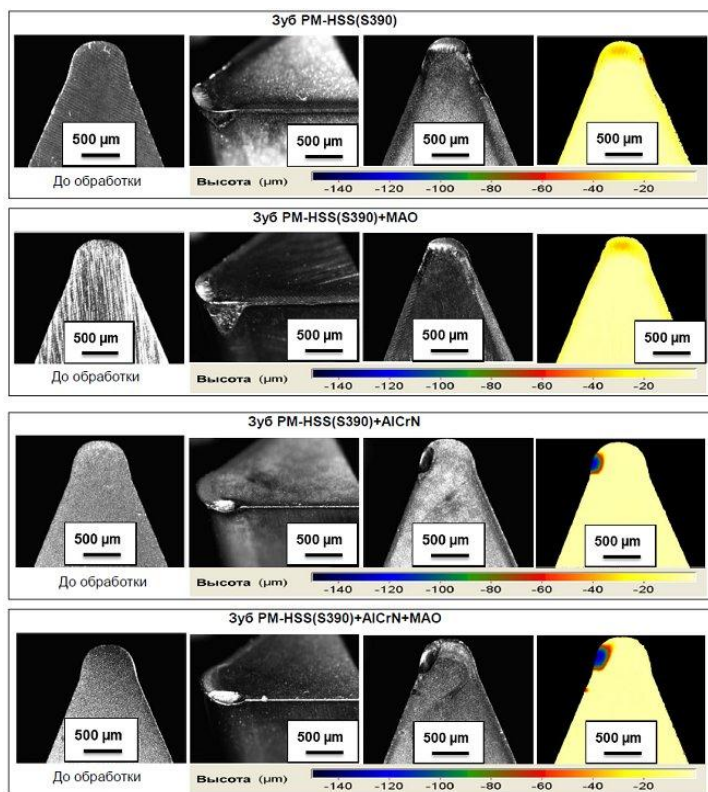


Рисунок 10 – Снимки износа передней поверхности зубьев с помощью MikroCAD GFM

К моменту разрушения покрытия, объем материала инструмента, ограниченный пятном контакта, имеет более высокие физико-механические характеристики (прочность, твердость), вследствие чего сопротивление изнашиванию данного участка выше, чем у материала основного объема матрицы зуба червячной фрезы.

Такой механизм связан с диффузионными процессами, и так как резание осуществлялось в воздушной среде, то можно предположить следующее - в процессе на рабочих поверхностях инструмента формируют слои, в значительной степени, зависящие от скорости диффузионных процессов и степени пластической деформации, а именно диффундирование кислорода из окружающей среды. При нарезании колес происходит постепенное уменьшение содержания азота на поверхности, входящего в состав покрытия, при этом кислород в воздушной среде замещает азот (рис. 12). Обеднение

поверхности покрытия азотом и обогащение кислородом во время резания связано с трибоокислением  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Такое образование кислородсодержащего соединения на основе алюминия действует как экран, защищающий поверхность и снижающий усилия при обработке.

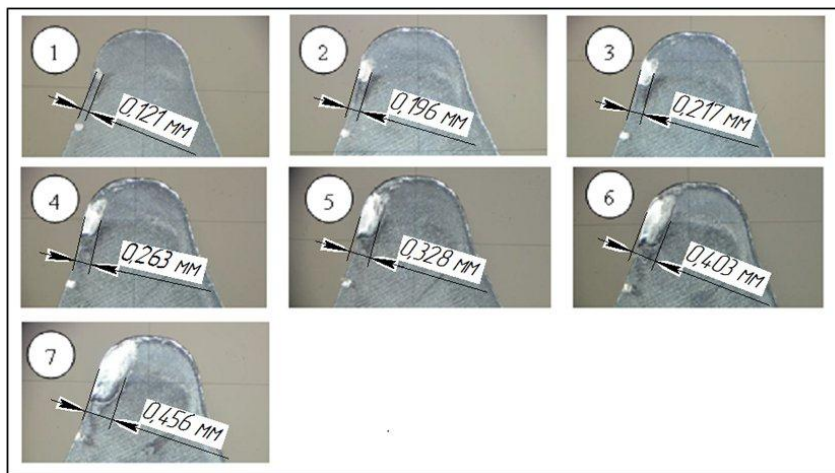


Рисунок 11 – Изменение площади контакта зуба PM-HSS(S390)+AlCrN по передней поверхности

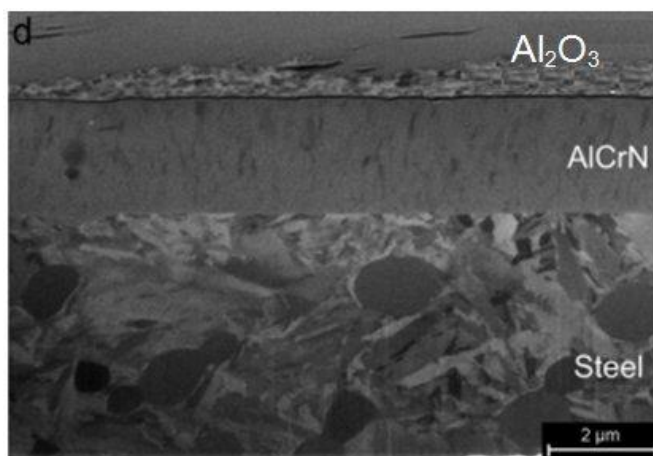


Рисунок 12 – Трансформация покрытия AlCrN при резании в кислородсодержащей среде

Обобщая изложенное можно отметить следующее:

- Износ всех исследуемых зубьев достигает критического значения на выходной режущей кромке.
- Нанесение покрытия AlCrN увеличивает стойкость червячной фрезы от 8 до 12 раз. При этом, вопросы рационального применения износостойких покрытий в процессах зубофрезерования скрывают огромный потенциал повышения стойкости и производительности, а в целом и повышения эффективности эксплуатации червячных фрез.
- Снижение интенсивности износа после разрушения износостойкого покрытия, так или иначе, связано с возможностью образования и возникновению достаточно прочных подповерхностных тонких слоев матрицы инструмента.

**Список использованных источников:** 1. Журнал Мир техники и Технологий № 2 2009 Экономическая эффективность применения современных червячных фрез, с. 24-31. 2. Журнал по металлообработке «Стружка» 30 (2012) «Использование покрытия AlTiCrN TripleCoatings3® при производстве зубчатых пар», с.14-15. 3. Oerlikon Balzers, 2008, Balinit Alcrona pro. 4. Дерли А.Н., Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Исследование износа зуборежного инструмента, работающего по методу обката// Справочник. Инженерный журнал. 1999. №6. С. 37-38. 5. Верещака А.С., Шустер Л.Ш., Мигранов М.Ш., Минигалеев С.М., Фукс-Рабинович Г.С. Комбинированные покрытия для повышения трибологических свойств и износостойкости инструмента из быстрорежущей стали // Вестник двигателестроения №2/2007. 6. Якубов Ч.Ф. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов путем направленной трансформации их исходных свойств: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Ч. Ф. Якубов – Х., 2004. – 153 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zhurnal Mir tehniki i Tehnologij № 2 2009 Jekonomicheskaja jeffektivnost' primeneniya sovremennyh chervjachnyh frez, s. 24-31. 2. Zhurnal po metalloobrabotke «Struzhka» 30 (2012) «Iskol'zovanie pokrytija AlTiCrN TripleCoatings3® pri proizvodstve zubchatyh par», s.14-15. 3. Oerlikon Balzers, 2008, Balinit Alcrona pro. 4. Derli A.N., Polohin O.V., Tarapanov A.C., Harlamov G.A. Issledovanie iznosa zuboreznogo instrumenta, rabotajushhego po metodu obkata// Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal. 1999. №6. S. 37-38. 5. Vereshhaka A.S., Shuster L.Sh., Migranov M.Sh., Minigaleev S.M., Fuks-Rabinovich G.S., Kombinirovannye pokrytija dlja povysheniya tribologicheskikh svojstv i iznosostojkosti instrumenta iz bystrorezhushhej stali // Vestnik dvigatelestroenija №2/2007. 6. Jakubov Ch.F. Povyszenie iznosostojkosti bystrorezhushhih instrumentov putem napravlennoj transformacii ih ishodnyh svojstv: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.03.01 / Ch. F. Jakubov – H., 2004. – 153 s.

*Поступила в редколлегию 19.08.2014*